Untersuchungen über den elektrischen Durchschlag durch Luft und feste Stoffe

Inaugural-Dissertation

zur Erlangung der Doktorwürde

genehmigt von der

Philosophischen Fakultät der Friedrich-Wilhelms-Universität zu Berlin

von

Joachim Bolze

aus Berlin

Tag der mündlichen Prüfung: 19. Juli 1934

Tag der Promotion: 17. Oktober 1934

1934

Druck: Triltsch & Huther, Berlin

582

Referenten:

Professor Dr. Nernst.

Professor Dr. Wehnelt.

R. UNIV.
BIBLIOTHEEK
LEIDEN

Meinen Eltern!

Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41550810_0106

Inhalt.

		Seite
I.	Einleitung	7
II.	Versuche zur Erzielung eines Mittendurchschlags	7
III.	Funkenuntersuchungen	9
IV.	Spannungsuntersuchung mittels Elektronenentladung	15
V.	Wanderwellenuntersuchung	18
VI.	Ausbildung des Funkens in Luft	19
VII.	Durchschläge durch feste Körper	20
VIII.	Zusammenfassung	22

I. Einleitung.

Schon vor längerer Zeit hatte Nernst die Vermutung geäußert, daß beim elektrischen Durchschlag durch einen festen Isolator wahrscheinlich eine Elektronenlawine die maßgebende Rolle spielt[1]). Im Gegensatz dazu stand die Ansicht, daß eine Ionenlawine den Durchschlag bewerkstelligt[2]). Für die Nernst'sche Ansicht sprach z. B. eine Arbeit von Rogowski[3]), in der mit einem Kathodenstrahloszillographen festgestellt wurde, daß der Durchschlag in der Zeit von etwa 10^{-7} sec erfolgt. Es ist schwer vorstellbar, daß in solch außerordentlich kurzen Zeiten sich Ionenlawinen ausbilden können. Für die Elektronenvorstellung besteht diese Schwierigkeit dagegen nicht. Vorliegende Arbeit wurde mit dem Ziel unternommen, die Elektronenanschauung durch experimentelle Prüfung zu untersuchen.

Werner hatte festgestellt, daß die Durchschläge zwischen Kugelelektroden nie an der Stelle größter Feldstärke, also in der Mitte, sondern stets etwas seitlich davon erfolgen[4]). Als Ursache dafür nahm er eine einleitende Gasentladung im Einbettungsmedium an[5]). Für das genaue Studium des Entladungsvorgangs im festen Isolator ist es nun aber nötig, daß der Durchschlag nur im zu untersuchenden Isoliermaterial stattfindet, zwischen Kugeln also in der Mitte.

Diesen Mittendurchschlag zu erreichen, war die erste Aufgabe vorliegender Arbeit. Eine weitere war, eine Entladung herzustellen, die nicht oszilliert; denn ein oszillierender Vorgang im Durchschlagsmaterial könnte etwaige polare Durchbruchseffekte abschwächen oder verwischen.

II. Versuche zur Erzielung eines Mittendurchschlags.

Um einen Mittendurchschlag zu erzielen, wurde der gefährliche Raum um die Elektroden herum mit einem Füllstoff ausgefüllt, dessen besondere Eigenschaften eine einleitende Entladung unmöglich machen sollten. Die Leitfähigkeit des Füllstoffs muß einerseits so

[1]) In der Dissertation von Werner, Ann. d. Phys. 86, 1928, S. 128, deren Fortsetzung vorliegende Arbeit bildet.

[2]) Z. B. Joffé, The Physics of Crystals, Mc Grew-Hill, New-York 1928, und N. Semenoff u. A. Walther, Die physikalischen Grundlagen der elektrischen Festigkeitslehre, Berlin 1928.

[3]) Rogowski, Arch. f. Elektrot. 18, 1927, S. 479.

[4]) W. Werner l. c.

[5]) Die inzwischen erschienene Arbeit von A. v. Hippel Z. f. Phys. 67, 1931 und 68, 1931 sowie 75, 1932 bestätigt diese Ansicht und begründet sie auch theoretisch.

groß sein, daß die Feldstärke in dem gefährlichen Gebiet sehr klein wird. Andererseits darf die Leitfähigkeit auch wiederum nicht zu groß sein, damit nicht die gesamte Spannung an den Enden des Füllstoffs auftritt. Als Füllstoffe wurden dest. Wasser und chin. Tusche verwendet. Es wurden Glimmer, Glas, Steinsalz und Cellophan durchschlagen. Die Platten wurden zwischen federnd zusammendrückenden Messinghohlkugeln (D = 15 mm) eingeklemmt. Die Flüssigkeit wurde vor oder nach dem Einklemmen mit einem Pinsel vorsichtig unter Vermeidung von Luftblasen auf beiden Seiten des Isolators aufgetragen. Die Spannungsquelle war die auch von W e r n e r benutzte 20-Platten-Influenzmaschine, die etwa 50 000 Volt gibt. Die Spannung wurde langsam und gleichmäßig bis zum Durchschlag gesteigert; sie wurde nicht gemessen, da ja nur das Aussehen der Durchschlagstelle untersucht werden sollte.

Die Durchschläge fanden aber, trotz aller Vorsichtsmaßregeln, niemals in der Mitte statt, sondern, wie immer, im Abstand von 1—2 mm vom Auflagepunkt der Elektroden. Der Grund für dieses negative Ergebnis scheint zu sein, daß bei der Verteilung der Flüssigkeit mit dem Pinsel mikroskopisch kleine Luftbläschen eingeschlossen wurden, die eine Entladung einleiteten. Es ließen sich wahrscheinlich bessere Resultate erzielen, wenn diese Versuche im Vakuum unter möglichster Vermeidung von Gasen gemacht würden, worauf W e r n e r auch schon hingewiesen hat; es wurden aber keine Versuche in dieser Richtung unternommen, da die im folgenden beschriebene Anordnung bequemer zum Ziele führte.

Die Spannung der von der Influenzmaschine aufgeladenen Leidener Flasche L (Fig. 1) entlädt sich über die Funkenstrecke Z;

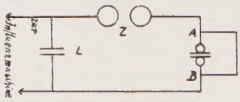

Fig. 1.

während der sehr kurzen Zeit, die die Entladewelle von A nach B braucht, liegt zwischen diesen beiden Punkten eine hohe Spannung (die genaue Besprechung dieses Vorgangs folgt weiter unten), die einen Funken erzeugt. Dieser kurze und schwache Funken (Schlagweite etwa 0,1 mm) wurde für Durchschläge durch ganz dünne Glimmerblättchen benutzt.

Mit diesem „kurzgeschlossenen" Funken war jeder Durchschlag ein Mittendurchschlag, sogar auch, wenn der Füllstoff Luft war. Daß es sich wirklich um einen genauen Mittendurchschlag handelt, wurde auf folgende Weise festgestellt: Das Glimmerblättchen klemmte zwischen leicht zusammenfedernden Elektroden; zog man es nach erfolgtem Durchschlag vorsichtig hervor, ohne die Elektroden hoch-

zuheben, so hinterließen die Elektroden auf den Glimmeroberflächen ganz feine Kratzspuren, die auf beiden Seiten immer genau beim Durchschlagsloch anfingen. Damit war das erste Ziel der Arbeit, der Mittendurchschlag, erreicht.

Dieses Ergebnis findet seine Erklärung wahrscheinlich darin, daß die kurze Zeit für einleitende Prozesse im Einbettungsmedium nicht ausreicht; wenn überhaupt ein Durchschlag erfolgt, findet er auf dem kürzesten Weg, also durch die Mitte, statt. Das wird auch dadurch bestätigt, daß die Durchbruchsfeldstärken bei diesem Versuch höher als bei gewöhnlichen Entladungen lagen. Die einen gewöhnlichen Durchschlag einleitenden Gasentladungen verzerren das Feld stark, so daß ein Durchschlag schon bei niedrigerer Spannung möglich ist. Fehlen die einleitenden Entladungen, so ist eine höhere Spannung nötig, um den Isolator im homogenen Feld zu durchschlagen.

III. Funkenuntersuchungen.

Zur systematischen Erforschung des Mechanismus des elektrischen Durchschlags durch feste Körper ist es notwendig, zuerst den Funken oder besser gesagt den Spannungsvorgang, mit dem der Durchschlag gemacht werden soll, genau zu untersuchen. Die erste vom Verfasser benutzte Untersuchungsmethode entsprach im wesentlichen der Methode von Feddersen[6]) mittels eines rotierenden Spiegels. Es wurde ein Metallhohlspiegel benutzt, der, auf der horizontalen Achse eines Elektromotors befestigt, maximal 100 Umdrehungen in einer Sekunde machen kann. Es stellte sich im Lauf der Versuche heraus, daß der Hohlspiegel sich durch die schnelle Rotation deformierte, so daß die bei ruhendem Spiegel scharfen Bilder der Funken bei der Drehung unscharf wurden. Um diesen Fehler zu verkleinern, wurde der Spiegel von außen her mit glanzlosem schwarzen Lack ringförmig bedeckt. Der Astigmatismus wurde durch seitliches Abdecken so korrigiert, daß ein horizontaler Strich einigermaßen scharf abgebildet wurde.

Nach vielen Vorversuchen entstand folgende Einrichtung zur visuellen und photographischen Beobachtung: Die Funkenstrecke wurde in ein Kästchen aus Pertinax, das nur eine kleine Oeffnung zum Spiegel hin hatte, eingebaut. Senkrecht darüber befand sich, lichtdicht gegen die Funkenstrecke, eine Mattscheibe, die gegen eine photographische Platte eingetauscht werden konnte. Scharfgestellt wurde bei stillstehendem Spiegel durch Hin- und Herbewegen des Holzkastens, in den das ganze System Funkenstrecke—Mattscheibe eingebaut war. Der rotierende Spiegel war in einen Kasten aus starkem Holz eingebaut, der zur Vermeidung von Nebenlicht mit Funken und Mattscheibe durch einen Lichtschacht aus Pappe ver-

[6]) W. Feddersen, Ann. d. Phys., 113, 1861, S. 437.

bunden wurde. Der Lichtweg war durch eine Metallklappe versperrt, die immer erst kurz vor der Aufnahme geöffnet wurde. Als Funkenstrecke diente ein Mikrometer mit 0,01 mm Ablesemöglichkeit mit 3 Kugeln. Durch die 3 Kugeln entstanden auf kleinstem Raum zwei Funkenstrecken (von denen die eine kurzgeschlossen wurde), die dann, beide hintereinandergeschaltet, die gleichzeitige Beobachtung eines oszillierenden und des zu untersuchenden kurzgeschlossenen Funkens ermöglichten. Auf der photographischen Platte wurde das Auffinden des meist lichtschwachen kurzgeschlossenen Funkens auf diese Weise sehr erleichtert. Zur Auslösung des Funkens bei der günstigsten Spiegelstellung diente ein auf der Achse des Motors befestigter Unterbrecher; dieser bestand aus einer Pertinaxscheibe, in die im Winkel von 90 Grad zwei halbkugelig abgedrehte untereinander metallisch verbundene Messingstäbe eingelassen waren. Den beiden sich drehenden Elektroden standen, um eine kleine Strecke tangential verschiebbar, zwei etwas größere Elektroden gegenüber; zwischen beweglichen und festen Elektroden war ein Luftspalt von etwa 1 mm. Es konnte immer nur dann ein Funken überspringen, wenn sich die Elektroden auf einen bestimmten Abstand genähert hatten. Durch Probieren wurde mittels der Mattscheibe die für jede Spannungshöhe günstigste Einstellung ausprobiert. Bei 100 Umdrehungen in der Sekunde ergibt sich für die Schwingungsdauer einer noch gut auflösbaren Funkenentladung 4×10^{-6} sec, was einer Wellenlänge von etwa 1200 m entspricht.

Die beschriebene photographische Anordnung diente nun zur Untersuchung der Seite 8 skizzierten Schaltung. F und G sind die Schaltfunkenstrecken des rotierenden Unterbrechers. Sie sind nach Figur 2 in den Kreis geschaltet. Bei der höchsten Umdrehungszahl

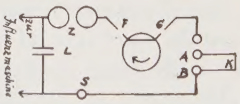

Fig. 2.

des Motors sah man auf der Mattscheibe nur ein auseinandergezogenes Lichtband, ohne die einzelnen Oszillationen erkennen zu können. Also war die Wellenlänge zu kurz. Man hätte nun den Lichtzeiger länger machen und damit eine größere „Dispersion" erhalten können; dadurch würde aber erstens die Lichtstärke so schwach werden, daß nichts mehr zu erkennen wäre; zweitens würde dann der optische Aufbau nicht mehr einwandfrei möglich sein, da man dann den Funken ganz nahe an den Spiegel bringen müßte.

Es wurde darum bei S (Fig. 2) eine Zylinderspule in den Schwingungskreis geschaltet, die eine Selbstinduktion von etwa $2{,}3 \times 10^{-4}$ Henry hatte. Die Leidener Flasche L hatte eine Kapazität

von etwa $1{,}7 \times 10^{-3}$ Mikrofarad. Aus diesen Maßen folgt eine Wellenlänge von etwa 1900 m. Die Funkenuntersuchung bestätigte diese Zahl auf etwa 5% genau. Als photographisches Material fanden Agfa-Isochrom-Platten im Format $4{,}5 \times 6$ cm Verwendung. Die Aufnahme geschah so, daß der rotierende Spiegel mit einem Tourenzähler auf eine bestimmte Umdrehungszahl einreguliert wurde (man hörte am Geräusch, wenn der Motor konstant lief); danach wurde die Platte eingelegt und die Influenzmaschine in Betrieb gesetzt. Die Fallklappe wurde erst geöffnet, wenn schon einige Funken übergeschlagen waren.

Die Länge des Kurzschlußbügels K (Fig. 2) wurde nun variiert; je kürzer er war, desto mehr von den Oszillationen verschwanden, bis bei 1 m Drahtlänge nur noch ein einfacher Durchbruch vorhanden war; allerdings war die Länge des nichtoszillierenden Funkens nur noch etwa 0,1 mm, also für die meisten Durchschlagsversuche zu klein. Die Funkenlänge bei F und G im Unterbrecher war 0,8 bis 1,2 mm, bei Z 6 mm.

Mit der beschriebenen Anlage konnten keine längeren nichtoszillierenden Funken erzielt werden. Es mußte die über den Draht laufende Spannungswelle erhöht werden, um zwischen A und B eine höhere Potentialdifferenz zu erhalten. Zu diesem Zweck wurde die M a r x'sche Stoßschaltung verwendet. Aus 6 gleichen Kapazitäten wurde eine Anlage gebaut, die einen Spannungsstoß von 300 000 Volt liefern kann. Sie sieht folgendermaßen aus: Die 6 Kapazitäten von je $1{,}7 \times 10^{-3}$ Mikrofarad sind durch Wasserwiderstände parallelgeschaltet, durch die sie auf die Spannung der Influenzmaschine aufgeladen werden. (Fig. 3.) Ist die Aufladung beendet, so schalten sie sich automatisch durch die Zündfunkenstrecken F hintereinander,

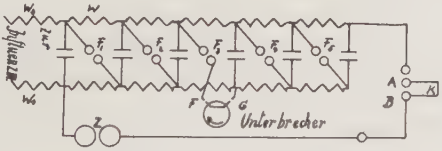

Fig. 3.

und man erhält die Summenspannung. Die Widerstände sind etwa 20 cm lange Glasröhren, gefüllt mit Leitungswasser. Die Leidenerflaschen ruhen horizontal auf Hartgummiklötzen mit Zwischenräumen von 30 cm. Die Zündfunkenstrecken bestehen aus Messinghohlkugeln (D = 3 cm), von denen die eine auf der Herausführung von der inneren Belegung der Leidener Flasche, die andere darüber in einem Holzrahmen in verstellbarer Entfernung sitzt. Zum Schutz der Influenzmaschine gegen Stoßwellen sind zwei etwas größere Wasserwiderstände Ws dazwischengeschaltet. Die ganze Stoßanlage hängt aus Isolationsgründen auf Holzwinkeln 30 cm von der Wand entfernt.

Zur Abschirmung wurde die hinter der Anlage befindliche Wand mit Stanniol beschlagen. Ferner wurden zum Schutz der Hausleitungen gegen induzierte Wanderwellen, die des öfteren Kurzschluß hervorgerufen hatten, in jede Leitung, die das Zimmer verläßt, eine scheibenförmig gewickelte Hochfrequenzdrossel gelegt, deren Enden über Kapazitäten von 1—2 Mikrofarad geerdet wurden. Hierdurch und durch den geerdeten Wandbelag, der wie ein Faradaykäfig wirkt, wurden sämtliche Störungen außerhalb des Laboratoriums vollkommen beseitigt. Die Aufladung durch die Influenzmaschine lieferte alle 30 sec einen Stoß. Die Gesamtkapazität der Anlage war etwa 3×10^{-4} Mikrofarad; es mußte daher eine große Selbstinduktion bei S eingeschaltet werden, damit der rotierende Spiegel die Schwingungen auflösen konnte. (Fig. 3.)

Bei Benutzung der Stoßanlage kann der rotierende Unterbrecher nicht wie vorher in den Schwingungskreis mit der Untersuchungsfunkenstrecke in Serie gelegt werden; denn der Stoß setzt ein, wenn an einer Zündfunkenstrecke die Spannung zum Durchbruch ausreicht, und nicht, wenn der Unterbrecher günstig steht. Man kann nur veranlassen, daß die Entladewelle an einer bestimmten Funkenstrecke einsetzt, und zwar dadurch, daß man diese etwas kleiner als die übrigen macht. Um nun die Stoßanlage zusammen mit dem rotierenden Spiegel betreiben zu können, wurde F_3 (Fig. 3) verkleinert und mit dem Unterbrecher in Serie geschaltet. Dadurch wurde erreicht, daß eine Zündungsstrecke der Stoßanlage hundertmal in einer Sekunde kleiner als die anderen war, was für ein einwandfreies Arbeiten der Anlage genügte, wie durch das Experiment festgestellt wurde. Die Funkenstrecke F_3 mußte eine ganz bestimmte günstigste Schlagweite haben, die durch Ausprobieren festgestellt wurde. Die Entladewelle breitet sich nun von F_3 nach beiden Seiten aus.

Mit der beschriebenen Anlage wurden nun nichtoszillierende Funken bis zu 2 mm Schlagweite zwischen 9-mm-Kugeln erhalten. Aus dem photographischen Bild des oszillierenden Funkens ergab sich für den ganzen Schwingungskreis eine Wellenlänge von 3300 m.

Eine weitere Spannungssteigerung wurde mit einer Oelfunkenstrecke erreicht, die in die positive Leitung eingeschaltet wurde. Es ist eine bekannte Tatsache, daß Oel einen hohen Durchschlagsverzug hat, daß also eine anlaufende Entladewelle zunächst weit über die Gleichstrom-Durchschlagspannung angestaut wird, um dann mit hoher Ueberspannung und entsprechend steil weiter zu laufen[7]). Die Oelfunkenstrecke wurde in einen Glastrog eingekittet; $^1/_{10}$ mm konnten von außen mittels Gewinde eingestellt werden. Zum Schutz des Glastroges gegen die beim Stoß auftretenden heftigen Druckwellen wurden zur Dämpfung Hartpapierplatten ins Oel gestellt. Die Oelschlagweite hat für jede auftreffende Spannungshöhe einen bestimmten günstigsten Wert.

[7]) Siehe z. B. Binder, Wanderwellenvorgänge, Berlin, 1928.

Die Untersuchung des Kurzschlußfunkens mit dem rotierenden Spiegel ergab, daß der Kurzschlußbügel 1,2 m lang sein mußte, damit nur noch ein einfacher Durchbruch vorhanden war.

Das Wegbleiben der Oszillationen unter dem Kurzschlußbügel erklärte sich der Verfasser zunächst folgendermaßen: Das Einsetzen der Entladung geschieht mit einem Stoß mit sehr steiler Stirn, wobei die Stirnlänge kurz ist gegen die Wellenlänge des Schwingungskreises. Die sich anschließenden Schwingungen sind sinusförmig. Die steile Stirn ruft an der Kurzschlußfunkenstrecke eine zum Durchbruch genügend hohe Spannung hervor. Die Steilheit der nachfolgenden Sinuswelle reicht nicht mehr zum Durchschlagen der Funkenstrecke aus. Zum Beispiel hat bei einer Entladung von 300 000 Volt eine Sinuswelle von 3000 m Länge im steilsten Teil eine Steilheit von etwa 500 Volt/m. Dagegen hat die Stirn, wie man ja mißt, im steilsten Teil eine Steilheit von etwa 30 000 Volt/m. Diese 30 KV überschlagen die Luftstrecke, aber die nachfolgenden 500 Volt laufen über den Kurzschlußdraht. Diese Ansicht schien durch folgenden Versuch bestätigt: Wurde die Funkenstrecke auf 0,1 mm eingestellt (diese Schlagweite entspricht etwa 500 V.), dann gingen tatsächlich noch einige Oszillationen über. Bei der Variation des Kurzschlußbügels stellte sich aber heraus, daß die Zahl der sichtbaren Oszillationen auch von dem Ohm'schen Widerstand des Kurzschlußbügels abhängen. Als Kurzschlußbügel wurde zuerst immer ein Messingdraht von 2 mm Stärke genommen, der einen Widerstand von 7×10^{-3} Ohm hat. Als nun ein ebensolanger Widerstandsdraht von 7 Ohm, also 1000 $\times$ größerem Widerstand, genommen wurde, oszillierte der kurzgeschlossene Funken wider Erwarten (wenn auch nicht so oft wie der nicht kurzgeschlossene). Daraus folgt, daß die geschilderte Vorstellung nicht richtig war. Vielmehr muß eine Art Stromverzweigung vorliegen:

Wenn der Funkenwiderstand, was man annehmen kann, in der Größenordnung von 1 Ohm liegt, so läuft die Welle, wenn der Funken mit einem 100 $\times$ kleineren Widerstand kurzgeschlossen ist, zum größten Teil über den Kurzschlußbogen; infolgedessen sind keine aufleuchtenden Oszillationen zu sehen. Es fließt vielleicht noch ein paarmal ein ganz schwacher Strom durch den noch vorhandenen Funkenkanal, bis die entstandenen Ionen rekombiniert haben; dieser schwache Strom kann den Funkenkanal aber nicht wieder zum Aufleuchten bringen. Macht man nun aber den Kurzschlußwiderstand 10 $\times$ größer als den Funkenwiderstand, so fließt der Strom zum größten Teil durch den Funkenkanal.

Wenn nun auch nicht zu erwarten ist, daß der Widerstand eines Funkenkanals im festen Körper sich sehr vom Funkenwiderstand in Luft unterscheidet, so bestand aber doch immerhin die wenn auch schwache Möglichkeit, daß Oszillationen im durchschlagenen festen Körper stattfinden konnten, die an dem Bild desselben Funkendurchbruchs durch Luft nicht zu erkennen waren. (Was allerdings durch

das Experiment nicht bestätigt werden konnte; denn als die später beschriebenen Durchschläge durch Paraffin mit eingeschlossener Metallfolie mit der eben beschriebenen Anlage gemacht wurden, war das Ergebnis genau dasselbe, wie mit den weiter unter geschilderten Anlagen!)

Um ganz sicher zu gehen, wurde für die Durchschlagversuche auch noch eine Anlage benutzt, wie sie von Binder angegeben worden ist[8]). Sie hat den Vorteil, daß nur die steile Stirn über die Anlage läuft, deren Energie dann in einem Widerstand aufgezehrt wird. Es können also darum keine Oszillationen stattfinden, weil die Spannung überhaupt nur einmal vorhanden ist. Die positive und die negative Entladewelle laufen auf parallelen in Schleifenform geführten Drähten entlang; die Schleifenform entspricht dem Kurzschlußbügel der vorhin beschriebenen Anordnung und hat ihr gegenüber den Vorteil der bequemen Regulierungsmöglichkeit der Kurzschlußbügellänge. Sind beide Wellen am Ende der Leiter-

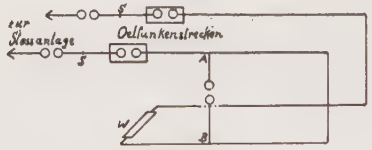

Fig. 4.

schleifen angekommen, so wird ihre ganze Energie von einem Ohmschen Widerstand W aufgenommen. Aus Symmetriegründen wurde die Wanderwellenleitung aus der Mitte der Stoßanlage herausgeführt und die beiden Enden mit der kürzesten Schaltfunkenstrecke zum rotierenden Unterbrecher geführt.

Als Widerstandsmaterial für W (Fig. 4) wurden nacheinander $MgSO_4$, NH_4Cl, $CuSO_4$, Silit und Hochohmdraht ausprobiert. $CuSO_4$ in einer Glasröhre (D = 1 cm) erwies sich als geeignetstes Material. Man kann nun zwar aus den geometrischen Abmessungen der Wanderwellenleitung die Größe des Widerstandes W theoretisch berechnen. Für die benutzte Anlage, die unmittelbar unter der Stoßanlage errichtet wurde, ergab sich ein Wert von etwa 700 Ohm. Theoretisch nicht erfaßbar aber ist der Einfluß der Umgebung; daher wurde ein variabler Wanderwellenwiderstand W benutzt, der nach Kontrolle mit dem rotierenden Spiegel einreguliert wurde. Die Einführung der Leitung in den Widerstand muß mit besonderer Sorgfalt hergestellt werden, damit an dieser kritischen Stelle keine Reflektionen stattfinden können. Aus diesem Grunde wurde der Widerstand W halbiert und je eine Häfte in die Verlängerung eines Leiterstranges gelegt. Beide Hälften wurden mit einem Drahtbügel ver-

[8]) Binder, l. c.

bunden, der eine bequeme Regulierung des Widerstandes ermöglichte. Binder rechnet nun den aufgenommenen Strom aus dem Abstand der beiden Leiter aus, wobei vorausgesetzt ist, daß die beiden Wellen sich immer genau gleichzeitig an entsprechenden Stellen befinden. Wenn nun Oelfunkenstrecken in die Leitung geschaltet sind, ist es durchaus denkbar, daß wegen des hohen Durchschlagsverzugs von Oel Zeitdifferenzen von 10^{-7} sec vorkommen können. Laufen beide Wellen nicht genau parallel, so folgt daraus ein anderer Strom in den Leitungen, der vom Wellenwiderstand nicht aufgenommen wird, so daß doch wieder Oszillationen stattfinden können. Die Untersuchung mit dem rotierenden Spiegel gestattete auch darüber eine Kontrolle.

Mit der eben beschriebenen Schaltung (Fig. 4) mit 2 Oelfunkenstrecken wurden kurzgeschlossene Funken von 4 mm Länge erzielt[9]). Die Stoßanlage hätte längere Funken liefern müssen, aber die beiden Selbstinduktionen S flachten die Welle sehr stark ab und nahmen ihr die Steilheit, die die hohe Spannung erzeugen würde. Wurden nun diese verschleifenden Spulen weggelassen, so wurden Kurzschlußfunken von 10 mm Länge erreicht. Dann löste aber der rotierende Spiegel die Schwingungen nicht mehr auf; es mußte also, da auch so hohe Spannungen verwendet werden sollten, ein anderer Weg gefunden werden, um eventuell auftretende Schwingungen erkennen zu können.

IV. Spannungsuntersuchung mittels Elektronenentladung.

Von der Erwägung ausgehend, daß Elektronen im Vakuum einer hohen Spannung sofort folgen, wurde eine Anordnung getroffen, die folgendermaßen aussah: In einem Glasrohr wurde einer Glühkathode ein mit Calciumwolframat bestrichenes Blech als Anode gegenübergestellt; das Ganze wurde so weit wie möglich evakuiert. Die beiden Elektroden wurden mit den beiden Punkten, zwischen denen die zu untersuchende hohe Spannung auftrat, verbunden (in Figur 4 also mit A und B). Läuft nun eine positive Welle auf der Leitung entlang, so erhält A eine hohe positive Spannung gegenüber B. Wird nun die eben genannte Leuchtanode mit A und die Glühkathode mit B verbunden, so leuchtet die Anode auf, da die aus der Glühkathode austretenden Elektronen durch die hohe Spannung stark beschleunigt auf die Anode aufprallen. Wird die Röhre nun umgepolt, so daß die Anode nach B kommt, so kann der Schirm nur aufleuchten, wenn Oszillationen vorhanden sind. Als Kathode mußte ein Material Verwendung finden, das ohne hell zu glühen stark emittiert, damit kein störendes Licht auftrat. Wegen der hohen

[9]) Diese Spannung reichte für viele der weiter unten beschriebenen Durchschlagsversuche schon aus.

Feldstärke durfte der Elektrodenabstand nicht zu klein gewählt werden, damit das Emissionsmaterial nicht durch elektrostatische Kräfte abgerissen werden konnte. Als Kathodenmaterial wurde im Vorversuch Bariumazid auf Platinfolie, das im Vakuum bei 300 Grad in das Oxyd umgewandelt wurde, benutzt. Auch mit Erdalkalikarbonaten wurden Versuche gemacht. Zuletzt wurden fertige, mit geeigneter Mischung bestrichene Nickelbänder[10]) verwendet, die sich sehr gut bewährten. Die Anode war ein schräg gestelltes elliptisches Nickelblech, das mit Calciumwolframat bestrichen wurde. Die Elektroden befanden sich in einem zylindrischen Glasrohr (D = 5 cm), das dauernd an einem zweistufigen Pumpenaggregat blieb. In einem elektrischen Ofen wurde das ganze Rohr bei 300 Grad ausgeheizt. Bei dauerndem Pumpen konnte Klebevakuum gehalten werden (kleiner als 10^{-4} mm Hg.). Das Quecksilber wurde mit flüssiger Luft ausgefroren. Die ganze Röhre konnte zum Umpolen mittels eines Schliffes um 180 Grad gedreht werden. Im Betrieb zeigte nun die Röhre das Aufleuchten in dem erwarteten Sinne.

Um das dauernde Umpolen zu umgehen, wurde die Röhre in folgender Weise geändert: Statt des einen Schirmes wurden zwei einander gegenüberstehende verwendet, zwischen denen sich die Glühelektrode befand. Die Schirme wurden dann mit den Punkten A und B der Drahtschleife verbunden (Fig. 4). Da im Ruhezustand beide Schirme das Potential 0 haben, umgibt sich der Glühfaden mit einer negativen Raumladungswolke, die ein weiteres Austreten von Elektronen verhindert. Läuft nun eine Welle vorbei, so werden die Elektronen zu der Elektrode hingeschleudert, die gerade Anode ist, und bringen diese zum Aufleuchten. Damit dieses Aufleuchten den anderen Schirm nicht zum Leuchten anregt, wurde zwischen beiden Schirmen in der Ebene des Glühfadens eine Blende mit einem Spalt für den Glühfaden angebracht. Diese Blende hat das gleiche Potential wie der Glühfaden. Um an den Glühfaden bequem heranzukommen, ist er, wie bei der vorigen Röhre auch schon, mittels eines Schliffes leicht aus der Röhre zu entfernen.

War die Länge des Laufweges für die Welle von A nach B 3 m, dann trat zwischen beiden Punkten eine Spannungsdifferenz von etwa 30 000 Volt auf. Der Wellenwiderstand wurde nun variiert und, um genau vergleichen zu können, das Leuchten der Schirme photographiert. Nach jedem Stoß mußte eine Weile gewartet werden, bis das Fluoreszenslicht der Schirme abgeklungen war. Auf diese Weise wurde der richtige Wert des Wellenwiderstandes ermittelt; er war etwa 750 Ohm. Bei kleinem Wellenwiderstand leuchten beide Schirme auf, während bei größer werdendem Widerstand der eine Schirm allmählich dunkler wird, bis er schließlich gar nicht mehr leuchtet.

[10]) Für die Ueberlassung des Elektrodenmaterials sei Herrn Prof. Wehnelt auch an dieser Stelle herzlichst gedankt.

Als die Heizung der Röhre variiert wurde, wurde festgestellt, daß auch bei kaltem Emissionsfaden Elektronen austraten. Da sich damit vielleicht die Möglichkeit bot, die unbequeme und störende Heizanlage zu umgehen, wurden Versuche mit folgender Anordnung gemacht: Eine Spitze steht einem Leuchtschirm im Abstand von etwa 2 cm gegenüber. Zur Vermeidung der Gleitentladungen an den Glaswänden entlang, die sich bei den vorigen Konstruktionen oft störend bemerkbar gemacht hatten, wurde eine Glaskugel (D = 10 cm) genommen; dadurch wurde überall ein genügend großer Abstand der Glaswand von den Elektroden erreicht. Es wurden nebeneinander an einer Pumpleitung 2 solche um 180 Grad gegeneinander gedrehte Röhren angebracht. Die Verbindung beider Röhren wurde zur Vermeidung gegenseitiger Bestrahlung beider Schirme schlangenförmig ausgeführt. Außerdem wurden beide Röhren noch durch schwarzes Papier optisch voneinander getrennt. Die schräggestellten kreisförmigen Schirme (D = 3 cm) wurden wieder mit Calciumwolframat bestrichen. Da bei diesem Versuch infolge der Elektrodenanordnung sehr hohe Feldstärken vorliegen und auch die Spannung nur sehr kurze Zeit vorhanden ist, liegt wahrscheinlich Elektronenaustritt aus kalter Kathode (Lilienfeldeffekt) vor; es stellte sich auch heraus, daß das Leuchten bei Gegenwart von Verunreinigungen besser war, daß also auch der Elektronenaustritt leichter erfolgte, was auch auf den erwähnten Effekt deutet. Mit dieser Röhre wurden die gleichen Ergebnisse wie mit der Glühelektronenröhre erzielt.

Zum Schluß wurden noch Versuche gemacht mit der von Binder[11]) angegebenen Stoßschaltung:

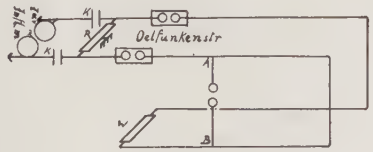

Fig. 5.

Durch eine Zündfunkenstrecke Z sind zwei Kapazitäten K verbunden, die sich dann im Moment der Zündung bei Z über die weiter oben beschriebene Wanderwellenleitung entladen. R ist ein hochohmiger Flüssigkeitswiderstand, der dazu dient, das Potential der Leitungen vor dem Durchbruch auf Null zu halten. Die Ergebnisse mit dieser Schaltung, die natürlich eine viel niedrigere Spannung als die Marx'sche Stoßschaltung lieferte, wurden zum Vergleich herangezogen.

[11]) Binder l. c.

V. Wanderwellenuntersuchungen.

Die Form der über die Leitung laufenden Wanderwellen wurde mit einer unverzögerten Kugelfunkenstrecke untersucht. Es stellte sich dabei unter anderem heraus, daß die positive Welle oft etwas anders aussieht, als die negative, was wahrscheinlich durch die Oelfunkenstrecken verursacht wird. Zur Messung wurde eine Funkenstrecke im Hartpapierring mit $^1/_{100}$ mm Einstellmöglichkeit verwendet, die auch für die weiter unten beschriebenen Durchschlagsversuche benutzt wurde. Meist wurden Stahlkugeln verwendet; zu einigen Versuchen wurden auch Schieferelektroden benutzt, deren Kapazität kleiner als die von Metallelektroden ist. Dadurch wurden die Durchschlagströme schwächer und es konnten feinere Effekte nicht durch Schmelzen bei zu starkem Strom zerstört werden. Zur Aufhebung der Funkenverzögerung wurde Radiumbestrahlung angewendet. Das Radiumpräparat konnte in einer Entfernung von 2—3 cm von den Kugeln in einer Messingklammer befestigt werden.

Zu den folgenden Wellenaufnahmen wurde zuerst eingehend der Einfluß von Radiumbestrahlung und dem Licht einer Quarzquecksilberlampe auf die Funkenentladung in Luft geprüft. Von den vielen Versuchen sei das Endergebnis mitgeteilt: Von den über die Leitung gelaufenen Wellen riefen bei unbestrahlter Funkenstrecke 28% einen Durchbruch hervor. Die Radium-Bestrahlung setzte den Prozentsatz auf 50% herauf, während die Quecksilberlichtbestrahlung nur eine Erhöhung um 3% brachte. Es wurde eine Hanau-Jubiläumslampe verwendet, deren Strahlen mit einer Quarzlinse auf die Kathode konzentriert werden konnten. Das Ergebnis dieses Versuchs steht zwar zunächst im Widerspruch mit den Versuchsergebnissen von Rogowski[12]), erklärt sich aber wohl einfach mit der viel kleineren Entfernung des Radiumpräparats von der Funkenstrecke als bei Rogowski. Infolge dieses Ergebnisses wurde bei den Wellenaufnahmen immer Radiumbestrahlung angewendet. Sie bewirkte im allgemeinen eine Erhöhung der Lichtintensität. (Auch bei den noch zu besprechenden partiellen Funken, deren deutliche Sichtbarkeit durch die Bestrahlung oft erst möglich wurde.)

Die Bestimmung der Form der Wanderwelle wurde so vorgenommen, daß die Funkenstrecke in Abständen von 10—20 cm an der Wanderwellenleitung befestigt wurde und dann so einreguliert wurde, daß von 10 Wellen 5 einen Ueberschlag bewirkten. Dies ist der übliche Weg, um zu einem Durchschnittsbild der Wellen zu gelangen. Da die Wellenform von dem Zündungsvorgang und dem Spannungszusammenbruch an den Zündfunkenstrecken, der nicht immer genau der gleiche ist, abhängt, unterscheiden sich die einzelnen Wellen immer etwas in Form und Höhe voneinander. Die Spannungen wurden aus den Schlagweiten graphisch interpoliert[13]). Die Wellen

[12]) Rogowski, Arch. f. Elektrot. 20, 1928, S. 625.
[13]) Nach dem Buch von Franck: Meßentladungsstrecken.

wurden so aufgetragen, daß von der Mitte nach beiden Seiten gleichmäßig immer die Hälfte der Spannung aufgezeichnet wurde. Der vordere flache Teil, der durch diese Methode entstand, wurde am Beginn der eigentlichen steilen Stirn abgeschnitten und hinten angefügt. Oszillationen können bei dieser Art, Wanderwellen zu untersuchen, natürlich nicht erkannt werden.

VI. Die Ausbildung des Funkens in Luft.

Bei der Aufnahme der Wanderwellen mit der Kugelfunkenstrecke kam es oft vor, daß die Spannung zum vollständigen Durchbruch nicht lange genug vorhanden war; und zwar war dann ein angefangener Funken zu sehen. Es konnten alle Ausbildungsstadien des Funkens beobachtet und photographiert werden. Soweit dem Verfasser bekannt ist, konnten bisher diese Teildurchbrüche von Luft nur durch Uebereinanderlagerung von vielen gleichartigen Entladungen photographisch sichtbar gemacht werden[14]). Denjenigen, die auch Wanderwellen mit Funkenstrecken untersucht haben, mußten wegen des angewendeten Quecksilberlampenlichts diese nur bei völliger Dunkelheit sichtbaren Durchbrüche entgehen. Die photographischen Aufnahmen wurden mit einer Leica (Brennweite 50 mm, Lichtstärke 3,5) auf höchstempfindlichem Agfa-Film in natürlicher Größe gemacht. Die beobachteten und photographierten[15]) Ausbildungsstadien sind folgende: Zuerst sieht man ein schwach leuchtendes Band zwischen den Elektroden, das verschiedene Gestalten annehmen kann. (Vorentladung.) Das Band entsteht an allen Stellen der Entladungsbahn gleichzeitig. Dann schnürt sich diese ziemlich dunkle Leuchterscheinung an der Anode zusammen und es zeigt sich an dieser Stelle der beginnende richtige helle Funken. Dieses helle Leuchten zieht sich dann sehr rasch zur Kathode hinüber auf dem noch vorhandenen ursprünglichen dunkleren Leuchtraum. Der eigentliche Durchbruch setzt sehr schnell ein; daher ist ein über mehr als den halben Luftweg sich erstreckender Leuchtfaden ganz selten zu sehen. Nach erfolgtem Durchbruch ist noch das schwach leuchtende erste Stadium um den hellen leitenden Funkenkanal herum zu erkennen. Bei starker Abblendung ist zu sehen, daß der anodische Teil der Entladung auch noch nach erfolgtem Durchbruch heller ist als der übrige Teil[16]).

[14]) Torok, J. A.I.E.E. 47, 1928, S. 177. Rogowski, Arch. f. Elektrot. 20, 1928. v. Hámos, Z. f. Phys. 52, 1928, S. 549. Ann. d. Phys. 7, 857, 1930.

[15]) Die Photographien sind im Besitz des Verfassers, sind aber wegen der schwachen Kontraste zur Reproduktion nicht geeignet.

[16]) Die Deutung dieser Vorentladungen vor dem vollkommenen Durchbruch siehe z. B. A. v. Hippel, Z. f. Ph. 57, 1929, S. 696.

VII. Durchschläge durch feste Körper.

Für die Durchschlagsversuche wurde die auf Seite 18 beschriebene Kugelfunkenstrecke benutzt. Das Durchschlagsmaterial wurde unter leichtem Druck zwischen den Kugeln (D = 1 oder 3 cm) eingeklemmt. Die Versuche wurden meist erst in Luft und dann mit destilliertem Wasser als Füllstoff gemacht. Die mikroskopischen Untersuchungen wurden mit maximal 300facher Vergrößerung ausgeführt. Es wurden alle oben beschriebenen Schaltungen, soweit sie einen geeigneten Spannungsstoß lieferten, benutzt.

Glas. Es wurden meist Deckgläschen, wie sie in der Mikroskopie Verwendung finden, benutzt. Es gelang bei den angewendeten Methoden immer, daß die Plättchen durch den Durchschlag nicht vollkommen zerstört wurden, sondern daß nur das Durchschlagsloch mit umgebenden Sprüngen entstand. Es war auf diese Weise immer eine mikroskopische Untersuchung der durchschlagenen Glasplättchen möglich. Dann wurde auch das Plättchen zerbrochen und der Durchschlagskanal genau untersucht. Es wurde aber auch bei Strombegrenzung durch Schieferelektroden kein polarer Effekt beobachtet.

Glimmer. Bei den Untersuchungen von Glimmer fand nur vollkommen durchsichtiges und klares Material Verwendung. Es wurde immer erst kurz vor dem Durchschlag auf die nötige Stärke gespalten. Nach erfolgtem Durchschlag wurde das Plättchen so weit wie möglich aufgespalten und an den erhaltenen ganz dünnen Plättchen die Durchschlagstelle genau untersucht, besonders bei den Schichten, die den beiden Elektroden nahe gelegen hatten. Es konnte auch hier keine Polarität entdeckt werden.

Steinsalz. Es wurde bei diesem kristallinen Körper beobachtet, daß mitunter an der Kathodenseite pyramidenförmige Trichter herausgerissen waren. Es erschienen aber inzwischen Arbeiten in der Literatur, die sich eingehend mit Steinsalz befaßten. Es wurden darum die Untersuchungen an diesem Material nicht weiter fortgesetzt, zumal da der gefundene Effekt sich sehr gut den Ergebnissen der anderen Arbeiten einfügte[17]).

Paraffin. Die Herstellung der Proben war folgende: Ganz dünnes Seidenpapier wurde in flüssiges Paraffin getaucht und nach dem Erkalten noch weiter mit Paraffin begossen, bis die gewünschte Stärke erreicht war. Zur Herstellung ganz dünner Proben wurden die Elektroden von beiden Seiten in das noch weiche Paraffin eingedrückt. Es ist nun bei derartigem Material an der Oberfläche sehr schwer etwas zu beobachten. Es wurde darum eine Oberfläche gefärbt, z. B. mit chin. Tusche, in der Erwartung, daß vielleicht gefärbte Teilchen mitgerissen würden, oder es wurde das Seidenpapier

[17]) A. v. Hippel, l.c., sowie L. Inge und A. Walther, Z. f. Phys. 64, 1930, 830.

gefärbt. Es konnten aber trotz mannigfacher Variationen der Versuche keine polaren Effekte beobachtet werden.

Schwefel. Die Herstellung der Proben war die gleiche, wie sie W e r n e r in seiner Arbeit beschreibt. Es wurden ähnliche Versuche wie bei Paraffin ausgeführt. Auch bei diesem Material ließ sich keine Polarität nachweisen.

Cellophan. Dieses Material ist bei Zimmertemperatur weich und hat eine sehr glatte Oberfläche. Es wurde besonders daraufhin untersucht, ob vielleicht eine polare Ausstülpung beim Durchschlag entstanden war, die bei seitlicher Beleuchtung unter dem Mikroskop hätte erkannt werden müssen. Das Durchschlagloch war aber immer auf beiden Seiten ganz glatt. Mit diesem leicht zu verarbeitenden Material wurden auch einige Durchschläge in flüssiger Luft gemacht. Aber auch diese Versuche waren ergebnislos.

Hartgummi und Hartpapier. Mit diesen Stoffen wurden Durchschläge, ähnlich wie unter Glimmer beschrieben wurde, gemacht. Sie hatten auch kein positives Ergebnis.

Abschließend muß also gesagt werden, daß an den beschriebenen amorphen Stoffen polare Durchbruchseffekte nicht beobachtet werden konnten. Es wurde darum noch folgender Versuch unternommen: Eine etwa 0,01 mm dicke Stanniolfolie wurde auf beiden Seiten mit Paraffin begossen. Wie auch schon beschrieben, wurden dann zur Erzielung dünner Proben die Elektroden eingedrückt. Die Durchschläge durch dieses System bewirkten nun auf dem Metall einen deutlichen Eindruck (wie mit einer Nadelspitze) der in der Metallebene einen Durchmesser von etwa 0,2 mm hatte (eher noch kleiner!). Dieser Eindruck lag immer an der Stelle, an der der Durchschlag durch das Paraffin gegangen war; das war während des Abschmelzens in heißem Paraffin sehr gut zu erkennen. Bei seitlicher Beleuchtung der Folie konnte ganz sicher entschieden werden, ob es sich um eine Vertiefung oder eine Erhöhung handelte. Dadurch, daß die Elektroden abgedrückt waren, war auch zu sehen, daß jeder Durchschlag ein Mittendurchschlag vor. Die Ausbauchung, die übrigens niemals das Metall durchbohrte, war immer zu der Elektrode hin gerichtet, die von der vorüberlaufenden Spannungswelle zuerst erreicht wurde, in Figur 5 also nach A. Lief eine positive (negative) Welle vorüber, so wurde A zur Anode (Kathode), während die andere Elektrode B solange das Potential 0 hatte, bis die Welle nach B gekommen war. Der polare Effekt blieb derselbe, wenn die Folie näher an eine Elektrode herangebracht wurde. Es wurden z. B. Proben durchschlagen, bei denen auf einer Seite nur ein ganz dünner Hauch von Paraffin aufgetragen war, so daß die Folie hindurchschimmerte. Es wurde versucht, ob dieser Eindruck auch erzeugt wurde, wenn sich nur eine Folie ohne umgebendes Paraffin zwischen den Kugeln befand. Die Folie, die mit Fäden gehalten wurde, zeigte aber nach erfolgtem Durchschlag keinen Eindruck.

Die Folie wurde dann auch mit einem Braun'schen Elektrometer verbunden und die Aufladung der Folie beim Durchschlag gemessen. Es stellte sich heraus, daß die Folie in allen Fällen ein negatives Potential annahm. Die Aufladung war am größten, wenn die Folie sich in der Mitte befand (etwa 40—50% der Durchschlagsspannung). Befand sich die Folie näher an der Kathode, so war die Aufladung nicht so groß (15—30%). Noch kleiner wurde die Aufladung, wenn sich die Folie an der Anode befand (5—20%). Der zu diesen Versuchen verwendete Spannungsstoß hatte eine Dauer von 10^{-7} sec, wie aus der Wanderwellenaufnahme folgte.

Die in jedem Fall negative Aufladung spricht dafür, daß sich im Moment des Durchschlags im wesentlichen nur Elektronen bewegen. Nicht einmal an Stellen, die für eine Bewegung der positiven Ionen besonders günstig wären, wie z. B. die unmittelbare Umgebung der Kathode (bei einer negativen Welle in Fig. 5 die mit A verbundene Elektrode), ließ sich eine positive Aufladung feststellen.

Die verschieden großen Aufladungen lassen sich vielleicht verstehen, wenn man die von v. Hippel entwickelte Theorie des Durchbruchs von Isolatoren anwendet: Nimmt man danach an, daß die Entladung wie bei Luft von der Anode her einsetzt, indem sich von dort eine durch abwandernde Elektronenlawinen erzeugte positive Raumladungsspitze nach der Kathode vorschiebt, so erscheint es möglich, daß die negative Elektronenaufladung der Folie an der Anode durch diese Raumladung abgeschwächt wird. Die positive Raumladungsspitze reicht aber wahrscheinlich nicht bis zur Mitte, daher die größere Aufladung der Folie in der Mitte. An der Kathode kann die Aufladung nicht groß sein, weil sich ja von dort nur wenige Elektronen in Richtung auf die Anode in Bewegung setzen, die dann auf ihrem Weg erst die starken Elektronenlawinen auslösen.

VIII. Zusammenfassung.

Es wurde auf verschiedene Weise versucht, den elektrischen Durchschlag durch einen Isolator zwischen Kugelelektroden an der Berührungsstelle Elektrode-Isolator, also in der Mitte, erfolgen zu lassen. Es gelang mittels einer „kurzgeschlossenen" Funkenstrecke.

Zur Erzeugung einer geeigneten Durchschlagsspannung wurden mehrere Schaltungen mit kurzgeschlossenen Funkenstrecken benutzt:

1. Eine Kapazität, entladen über eine geeignete Funkenstreckenanordnung.
2. Eine Marx'sche Stoßanlage mit 6 Kapazitäten entladen wie bei 1.
3. Eine Marx'sche Stoßanlage mit 6 Kapazitäten entladen über eine Binder'sche Schleife.
4. Eine Binder'sche Stoßanlage.

Diese Schaltungen wurden nach 2 verschiedenen Methoden auf Oszillationen hin untersucht:

1. Durch Funkenuntersuchung. Der Funkendurchbruch in Luft von Atmosphärendruck wurde mit einem rotierenden Spiegel untersucht.
2. Durch Anwendung von Elektronenentladung im Vakuum.
   a) Es wurde eine Entladungsröhre hergestellt, die im Hochvakuum einen Glühdraht als ergiebige Elektronenquelle zwischen zwei Fluoreszensschirmen enthielt. Die zu untersuchende Spannung wurde an die Schirme gelegt; bei nicht oszillierender Spannung leuchtete nur ein Schirm auf.
   b) Es wurden zwei Entladungsröhren hergestellt, die im Hochvakuum je eine Spitze einem Fluoreszensschirm gegenüberstehend enthielten. Beide Röhren wurden mit der zu untersuchenden Spannung verbunden. Bei nicht oszillierender Spannung leuchtete nur der Schirm einer Röhre auf.

Mit jeder der vier Schaltungen wurden auf eine der beiden Methoden nicht oszillierende Funken oder Spannungen festgestellt.

Beim Arbeiten mit einer mit Radium bestrahlten Kugelfunkenstrecke wurden die Ausbildungsstadien des Funkendurchbruchs in Luft von Atmosphärendruck beobachtet und photographiert.

Es wurde sehr eingehend der Einfluß von Radiumbestrahlung und dem Licht einer Quecksilberlampe auf die Funkenentladung in Luft untersucht. Für die vorliegenden Versuche erwies sich Radiumbestrahlung als die geeignetere.

Mit den gewonnenen nichtoszillierenden Spannungen wurden Durchschläge durch Glas, Glimmer, Paraffin, Schwefel, Cellophan, Hartgummi und Hartpapier gemacht. Es konnte trotz verschiedenartigster Bearbeitung des Durchschlagsmaterials kein polarer Durchbruchseffekt beobachtet werden.

Eine in Paraffin eingebettete Stanniolfolie zeigte an der Durchschlagstelle einen Eindruck, der immer zu der Elektrode gerichtet war, die von der vorbeilaufenden Spannungswelle zuerst berührt wurde. Die Aufladung der Folie war immer negativ, was als Elektronenphänomen gedeutet wird.

Vorliegende Arbeit ist entstanden im physikalischen Institut der Universität Berlin. Meinem hochverehrten Lehrer, Herrn Professor Dr. Nernst, möchte ich auch an dieser Stelle für die Anregung zu dieser Arbeit, für sein stetes Interesse und seine wertvollen Ratschläge, mit denen er mich während meiner Arbeit freundlichst unterstützt hat, meinen ergebenen Dank ausdrücken.

Dem Herrn Professor Dr. Nernst zur Verfügung gestellten Isolierstoffonds (A.E.G., Siemens, General Electric Comp.) verdanke ich die Beschaffung einiger Apparate.

Lebenslauf.

Am 6. März 1909 wurde ich als Sohn des Lehrers Albert Bolze und seiner Ehefrau Elisabeth, geb. Banning, beide evangelischer Konfession und arischer Abstammung, in Berlin geboren. Hier besuchte ich auch das Sophien-Gymnasium, das ich 1927 mit dem Zeugnis der Reife verließ, um mich dem Studium der Physik zuzuwenden. Bis auf das Sommer-Semester 1929, das ich an der Universität Göttingen zubrachte, war ich immer an der Universität Berlin immatrikuliert. Während der Semesterferien arbeitete ich mehrmals in Fabriken (Osram und Dralowid). Meine akademischen Lehrer waren die Herren Bieberbach, Bodenstein, Czerny, Dessoir, Feigl, Franck, Hahn, Hammerstein, Hettner, Hopf, Köhler, v. Laue, Marckwald, Meyermann, v. Mises, Nernst, Planck, Pringsheim, Reich, Rieffert, Schlenck, Erh. Schmidt, Schrödinger, Schur, Spranger, Vierkandt und Wehnelt.

Ihnen allen bin ich zu Dank verpflichtet.